

doi: 10.3969/j.issn.2095-1744.2022.07.04

# 激光烧结原位合成钨精原矿粉/ Al-Cu 复合材料组织结构及致密性

水东莉<sup>1</sup>, 李刚<sup>2</sup>

(1. 辽宁农业职业技术学院 农业装备工程学院, 辽宁 营口 115009;

2. 营口理工学院, 辽宁 营口 115014)

**摘要:** 利用激光束高能量为燃烧热源, 引发体系 Al 热反应与钨精原矿粉中  $WO_3$  进行置换, 原位自生增强相, 制备钨精原矿粉/Al-Cu 复合材料。利用 OM、SEM、XRD、TEM 等研究了激光工艺参数、成分配比和压制压力对复合材料微观结构和致密性的影响规律。结果表明: 复合材料由  $\alpha$ -Al、 $\alpha$ -(Al, W) 和中间相构成的多相结构为基体, 纳米晶颗粒  $Al_2O_3$  为增强相的复杂复合组织构成; 随着功率的增加及作用时间的延长, 烧结产物组织均匀细化程度明显提高。当激光功率为 1 000 W, 持续作用时间为 30 s 时, 试样组织晶粒最均匀细小; 激光的工艺参数、原始压坯相对密度和成分配比影响烧结产物的致密性。当工艺参数激光功率为 1 000 W, 持续作用时间为 30 s, 压坯相对密度为 85%, Al/Cu 的成分配比为 66.8 : 33.2 时, 产物的孔隙率最低为 3.67%, 合成密度最大为 3.58 g/cm<sup>3</sup>, 致密化程度最高。

**关键词:** 烧结; 钨精原矿粉; 微观结构; 组织; 致密性

**中图分类号:** TG139      **文献标志码:** A      **文章编号:** 2095-1744(2022)07-0026-07

## Densification and Microstructure of Tungsten Ore/Al-Cu Composites synthesized in Situ by Laser Sintering

SHUI Dongli<sup>1</sup>, LI Gang<sup>2</sup>

(1. School of Agricultural Equipment Engineering, Liaoning Agricultural Vocational and Technical College,  
Yingkou 115009, China;

2. Yingkou College of Technology, Yingkou 115014, China)

**Abstract:** The high temperature energy of the laser beam was used as the combustion heat source to initiate the Al thermal reaction of the system and replace the  $WO_3$  in tungsten concentrate powder, and the in situ self-strengthening phase was used to prepare tungsten carbide powder/Al-Cu composite material. The effects of laser processing parameters, component ratio and pressing pressure on the microstructure and compactness of the composites were characterized by OM, SEM, XRD and TEM. The results show that composite materials consist of complex composite structures. The matrix is a multiphase structure composed of  $\alpha$ -Al,  $\alpha$ -(Al, W) and

**收稿日期:** 2022-01-19

**基金项目:** 辽宁省教育厅科技研究项目资助(LJKZ1195); 营口理工学院创新团队支持计划资助(TD202001); 营口理工学院高层次人才科研启动项目资助(YJRC202014)

**Fund:** Supported by Science and Technology Research Project of Liaoning Provincial Department of Education(LJKZ1195); Program for Innovative Research Team in Yingkou Institute of Technology(TD202001); High-level Talents Research Project of Yingkou Institute of Technology(YJRC202014)

**作者简介:** 水东莉(1986—), 女, 硕士研究生, 讲师, 主要从事激光引燃制备复合材料的研究。

**通信作者:** 李刚(1969—), 男, 蒙古族, 博士, 教授, 主要从事高能束材料表面改性研究。

**引用格式:** 水东莉, 李刚. 激光烧结原位合成钨精原矿粉/Al-Cu 复合材料组织结构及致密性[J]. 有色金属工程, 2022, 12(7): 26-32.

SHUI Dongli, LI Gang. Densification and Microstructure of Tungsten Ore/Al-Cu Composites synthesized in Situ by Laser Sintering[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2022, 12(7): 26-32.

intermetallics. The reinforcing phase is composed of nanocrystalline  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . With the increase of power and action time, the microstructure uniformity and refinement degree of sintered products increased significantly. When the laser power is 1 000 W and the duration is 30 s, the microstructure and grains of the sample are the most uniform and fine. The process parameters of laser, the relative density of the original compact and the composition ratio affect the compactness of the sintered products. When the technological parameters are 1 000 W, 30 s, the relative density of the billet is 85%, and the component ratio of Al/Cu is 66.8 : 33.2, the porosity of the product is 3.67%, the maximum density of synthesis is 3.58 g/cm<sup>3</sup>, the degree of densification is the highest.

**Key words:** sinter; tungsten ore; microstructure; organization; densification

铝基复合材料因具有密度低、耐磨性好、强度高、良好的尺寸稳定、易成型等特点,被广泛应用于航空航天、船舶和汽车等领域<sup>[1-3]</sup>。通常制备方法主要有粉末冶金法、搅拌铸造法、挤压铸造法、喷射成形法<sup>[4-8]</sup>等,为增加复合材料的综合性能往往需要外添加颗粒粗大增强相(如  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、TiC、SiC、WC 等),所以易引起界面结合问题和增强体易偏聚等问题,且工艺过程复杂,能耗高,成本高<sup>[9-10]</sup>。

激光烧结技术是以激光束高能量为燃烧热源,引发体系发生强烈放热反应,使增强相原位自生的一种制备金属基复合材料的新技术<sup>[11]</sup>。采用该技术制备的复合材料避免了外添加增强相,使产物无污染,增强相均匀细小与基体黏结良好,反应迅速,易形成非平衡相,可进一步提高复合材料性能,且工艺过程简单和成本低<sup>[12]</sup>,成为制备复合材料技术发展的重要方向。如吴海华等<sup>[13]</sup>利用激光燃烧合成技术制备了低导热高强度石墨陶瓷;安荣等<sup>[14]</sup>利用激光诱发自支撑 Ti/Al 纳米多层膜的自蔓延反应,研究了纳米多层膜激光诱发临界能量密度和组织结构。

W 是一种稀有元素,对提高合金的抗氧化性和力学性能具有显著作用。但利用传统工艺生产钨粉需要经过生产仲钨酸铵和钨粉的制备等冗长且复杂的工序<sup>[15-17]</sup>。以钨精原矿粉为原料,充分利用其中的钨和氧两种元素,制备低成本高性能的金属基陶瓷复合材料,是矿产利用和开发的一个新方向<sup>[18-19]</sup>。本文利用激光高能量引发铝热反应,诱导钨精原矿粉中  $\text{WO}_3$  进行置换反应,原位自生  $\text{Al}_2\text{O}_3$  增强相,因金属基陶瓷复合材料的孔隙率和致密性对其组织结构和性能有重要影响,故探究了工艺参数、成分配比和压制压力对产物微观结构和致密性的影响。

## 1 实验材料和方法

实验原料分别为铝粉(纯度  $\geq 99.8\%$ , 200  $\mu\text{m}$ ),铜粉(纯度  $\geq 99.0\%$ , 100~200  $\mu\text{m}$ ),粉碎

的钨精矿石粉末( $\text{WO}_3 \geq 70\%$ , 200  $\mu\text{m}$ ),将 3%(与 Al-Cu 的质量比)的钨精原矿粉末添加到铝粉与铜粉中,质量百分比见表 1,并置于 QM-1SP2 型行星式球磨机内混合 6 h。利用压坯磨具,在 WE-30 型液压实验机上单向模压,制成尺寸  $\Phi 16 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$  的圆柱试样备用。

表 1 实验原料成分配比

Table 1 Mass fraction of experimental materials /%

Elements	Samples		
	No. 1	No. 2	No. 3
Al	83.98	66.8	52.85
Cu	16.02	33.2	47.15

使用 HL-1500 无氦横流  $\text{CO}_2$  激光加工机从试样顶部引燃,引燃的功率分别为:900、1 000、1 100 W;加热时间分别为 20、25、30、35 s,光斑尺寸为  $\Phi 15 \text{ mm}$ 。

采用 SSX-550 型扫描电子显微镜、Tecnai G220 S-Twin 型透射电镜和 XJL-02A 型立式金相显微镜对烧结产物的显微组织、表面形貌、晶体结构和孔隙分布形貌等进行分析。

采用 XRD-6000 型 X 射线衍射仪(Cu 靶,扫描范围  $20^\circ \sim 100^\circ$ ,扫描速度  $10^\circ/\text{min}$ )对烧结产物进行物相分析。

根据公式  $\theta = 1 - \frac{\rho_s}{\rho}$  计算试样的孔隙率。式中: $\theta$  为孔隙率,%; $\rho_s$  为压坯的烧结试样密度,  $\text{g}/\text{cm}^3$ ;  $\rho$  为压坯理论密度,  $\text{g}/\text{cm}^3$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 物相分析

图 1 是在工艺参数激光功率为 1 000 W,持续作用时间为 30 s 的条件下,添加 3% 钨精原矿粉末的不同 Al-Cu 成分配比烧结产物的物相分析结果。可知,烧结产物由  $\alpha\text{-Al}$ 、金属间化合物  $\text{CuAl}$ 、 $\text{CuAl}_2$ 、 $\text{Cu}_9\text{Al}_4$ 、硬质相  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和固溶体  $\alpha\text{-(Al,W)}$  构成。说明体系利用激光束高能量作为燃烧热源发生

Al热反应,与原矿粉中 $WO_3$ 的发生置换反应生成 $Al_2O_3$ 和W。因钨精原矿粉末含量较少,生成的W元素固溶到基体中形成 $\alpha-(Al,W)$ 。并且由于激光燃烧合成Al与Cu发生非平衡反应,烧结时间短,冷却速度快,所以产生了 $CuAl$ 、 $CuAl_2$ 、 $Cu_9Al_4$ 等中间相,形成多相结构。从XRD图谱可以看出, $\alpha-Al$ 、 $CuAl$ 、 $CuAl_2$ 、 $Cu_9Al_4$ 金属间化合物的峰值较高 $Al_2O_3$ 的峰值较低,说明 $Al_2O_3$ 含量较少,为增强相, $\alpha-Al$ 和中间相含量较多,为基体。

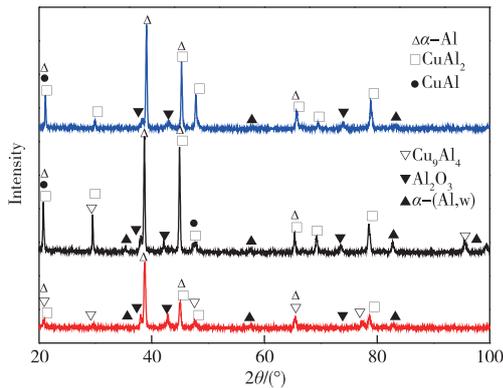


图1 添加3%钨精原矿粉的烧结产物XRD图谱  
Fig. 1 XRD patterns of sintered products with 3% tungsten concentrate powder

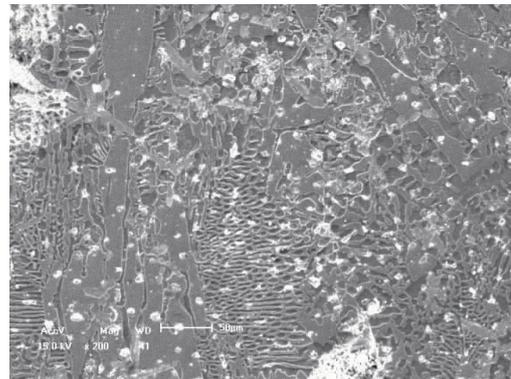
## 2.2 微观形貌分析

图2为成分为No.1的不同工艺参数下烧结产物微观组织形貌。可以看出,烧结后试样组织呈现多相共存。随着功率的增加及作用时间的延长,试样组织细化与均匀化程度提高。当激光功率为1000W,持续作用时间为30s时,试样组织最为均匀细小,如图2(c)为均匀丰富的树枝晶组织,且均匀弥散分布着硬质相。其主要原因为当烧结功率较低时,阻碍了主放热反应的进行,固态颗粒之间相互扩散形成中间产物,阻碍液相扩散。而当功率较大时,过冷度大,形成负的温度梯度,加速非密排晶体的生长,使这部分晶体伸展突出于液相,形成方向大致相同,间距大致相等的枝干。由分析可知, $Al_2O_3$ 硬质相可由铝热反应原位自生,在合成反应中起到形核剂的作用,使析晶过程容易进行,从而有利组织的细化。在高温时延长点燃时间会减小温度梯度,有利于提高组织的均匀化,如图2(b)、(c)。

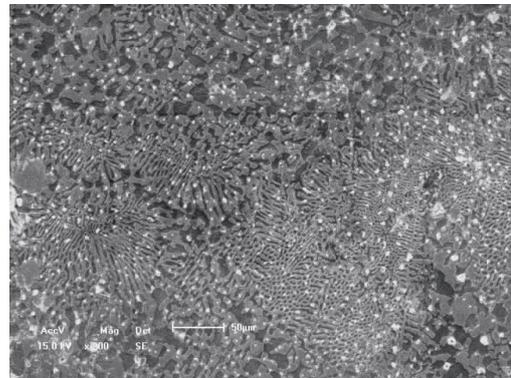
图3为激光功率为1000W,持续作用时间30s烧结产物的微观结构形貌,并对图中的A、B、C、D四个选区进行电子衍射,如图4所示。由图4分析可知,A区为 $Al_2O_3$ 纳米多晶衍射环;B区为六倍周期单晶 $Al_2O_3$ 的析出相颗粒;C区为面心立方铝的基体相;



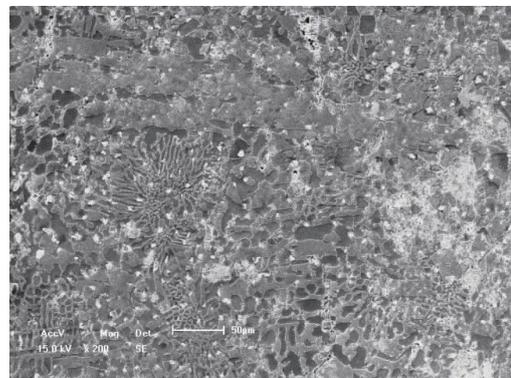
(a)900 W,30 s



(b)1000 W,20 s



(c)1000 W,30 s



(d)100 W,20 s

图2 不同工艺参数下烧结产物组织形貌  
Fig. 2 Microstructure images of sintered products under different technological

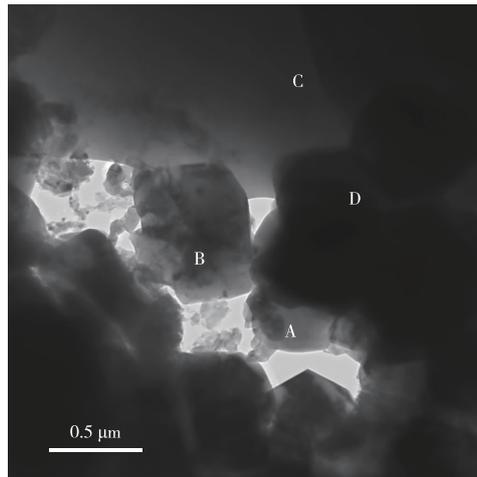


图 3 烧结产物微观结构

Fig. 3 Microstructure of sintered product

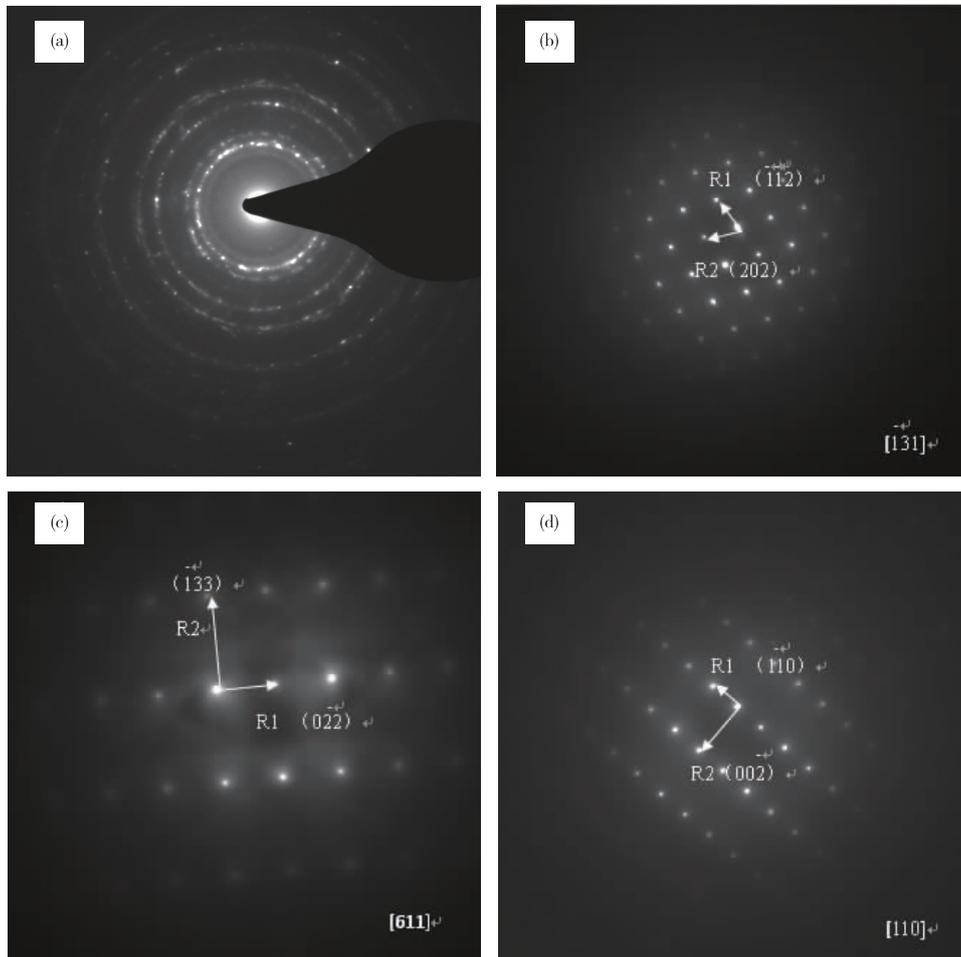


图 4 烧结产物 TEM 图像:(a)A 选区衍射斑点;(b)B 选区衍射斑点;(c)C 选区衍射斑点;(d)D 选区衍射斑点

Fig. 4 TEM image of sintered product:(a)A selected area electron diffraction pattern;(b)B selected area electron diffraction pattern;(c)C selected area electron diffraction pattern;(d)D selected area electron diffraction pattern

D 区为由单晶金属间化合物  $\text{CuAl}_2$  构成的中间相。说明燃烧合成过程中,钨精原矿粉末中的氧元素与基体中的铝原位自生成纳米级的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  增强颗粒。

由此可见,烧结产物基体是由高韧性的面心立

方 Al、中间相和固溶体  $\alpha\text{-}(\text{Al}, \text{W})$  构成的多相结构构成;增强相为纳米晶颗粒  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 。烧结产物形成的金属间化合物形状各异,并且之间分布着纳米晶。烧结时,活性元素的短程扩散致使一些亲合力较好

的元素之间发生化合结晶形成晶核,同时,元素之间的扩散与重组,保证试样组织的均匀细小,有利于提高复合材料的综合性能。

### 2.3 产物致密性

#### 2.3.1 激光工艺对烧结产物致密性影响

图5为不同工艺参数下烧结产物密度和孔隙率的柱状图。由图5可知,孔隙率与烧结试样的密度成反比,烧结产物的孔隙率随着激光功率的增加呈现下降趋势。当工艺参数为激光功率为1 000 W、持续作用时间30 s时,孔隙率最低为3.67%,合成密度最大为3.58 g/cm<sup>3</sup>。主要原因在于提高功率,可以加速主放热反应的发生,且伴随着预燃烧反应,使液相覆盖固体颗粒粉末瞬间发生液相烧结,提高中间产物扩散速率,并且液相可以填充试样内的孔隙,从而获得高致密性的烧结产物。此外,烧结过程中增加点火延迟时间可以使试样体内残留气体均匀逸出,进一步提高产物的致密性。

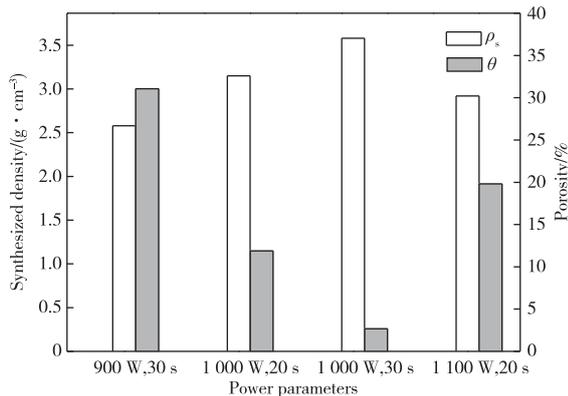


图5 不同工艺参数下烧结试样的密度( $\rho_s$ )和孔隙率( $\theta$ )

Fig. 5 Density ( $\rho_s$ ) and porosity ( $\theta$ ) of sintered samples with different process parameters

#### 2.3.2 原始压坯相对密度对烧结产物致密性的影响

图6为Al-Cu的质量比为66.8:33.2,工艺参数为激光功率为1 000 W、持续作用时间30 s时,压坯相对密度对试样合成密度和孔隙率的影响曲线。由图6可知,在一定范围内,提高压坯相对密度可以增加烧结产物的致密性,当原始压坯相对密度为85%时,烧结密度最大,孔隙率最低。由于试样采用单向模压制,压坯中粉末颗粒之间属于机械结合存在空隙。烧结时粉末颗粒之间发生冶金反应逸出空气形成冶金结合。当压坯密度太低会使压坯空隙增大,导致自蔓延困难;而较大的压坯密度因热导率高,造成烧结时产生较大的热量损失,使反应不易进行。因此,太低或太高的压坯相

对密度都会降低试样的孔隙率影响致密性。

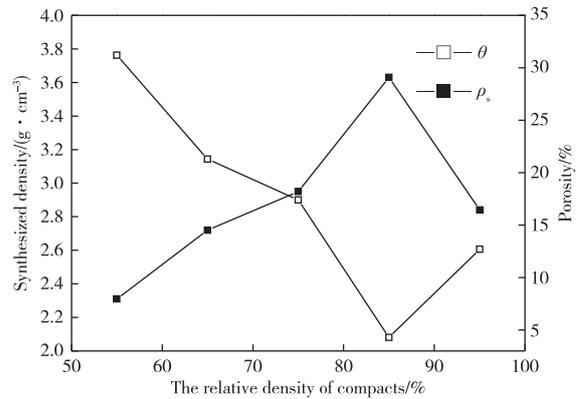


图6 不同压坯相对密度下烧结产物密度( $\rho_s$ )和孔隙率( $\theta$ )

Fig. 6 Density ( $\rho_s$ ) and porosity ( $\theta$ ) of sintered samples with different relative density of compacts

#### 2.3.3 成分比对烧结产物致密性的影响

图7为工艺参数为激光功率1 000 W、持续作用时间30 s时,铝含量对烧结产物合成密度和孔隙率的影响曲线。从图7中可以看出,当Al-Cu的分配比为66.8:33.2(即Al/Cu共晶成分)时,产物的致密性最好,烧结密度为3.48 g/cm<sup>3</sup>。成分比引起钨精矿石Al/Cu压坯烧结产物致密性变化的因素主要有以下四方面:1) Al/Cu的共晶相熔点低,且流动性能好,有助于冶金反应过程中填充固体颗粒之间的孔隙,提高致密性;2) 亚共晶和过共晶成分偏离了化学计量比,降低了反应温度和燃烧波蔓延的速度,且不均匀的固相收缩力会引起压坯内产生缩孔;3) 添加一定比例的钨精矿石粉末起到了稀释作用,使冶金反应剧烈程度降低,周围细小颗粒和晶粒在毛细引力的作用下被液相包覆,有充足的时间填充孔隙;4) 铝热反应原位自生的W元素固溶到基体中产生晶格畸变,促进了产物的致密性。

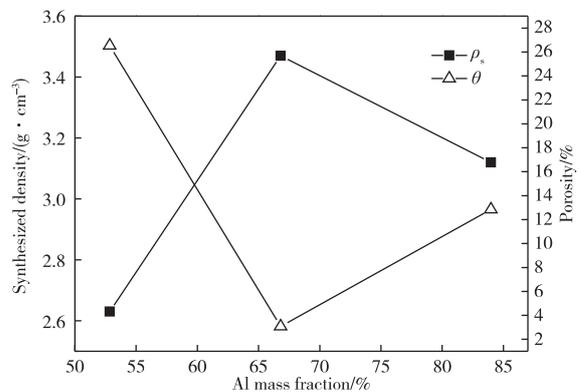


图7 不同成分比的烧结产物密度( $\rho_s$ )和孔隙率( $\theta$ )

Fig. 7 Density ( $\rho_s$ ) and porosity ( $\theta$ ) of samples with different composition ratio

### 3 结论

1) 钨精原矿粉/Al-Cu 复合材料是由  $\alpha$ -Al,  $\alpha$ -(Al, W) 和中间相构成的多相结构为基体, 纳米晶颗粒  $\text{Al}_2\text{O}_3$  为增强相的复杂复合组织构成。

2) 随着功率的增加及作用时间的延长, 烧结产物组织均匀细化程度明显提高。当激光功率为 1 000 W, 持续作用时间为 30 s 时, 试样组织晶粒最均匀细小。

3) 激光的工艺参数、原始压坯相对密度和成分配比影响激光烧结钨精原矿粉/Al-Cu 体系烧结产物的致密性。当工艺参数为激光功率为 1 000 W、持续作用时间 30 s, 压坯相对密度为 85%, Al/Cu 的成分配比为 66.8 : 33.2 时, 产物的孔隙率最低 3.67%, 合成密度最大为 3.58 g/cm<sup>3</sup>。

#### 参考文献:

- [1] BEYGI H. Microstructure and mechanical properties of Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> micro and nano composites fabricated by stir casting [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2011, 528(29/30): 8765-8771.
- [2] 李刚, 邱信伟, 宋艳东, 等. 激光引燃自蔓延烧结 AlCrFeNiSi<sub>x</sub> 多孔高熵合金组织及性能[J]. *有色金属工程*, 2019, 9(4): 28-33.  
LI Gang, QIU Xinwei, SONG Yandong, et al. Microstructure and properties of AlCrFeNiSi<sub>x</sub> porous high-entropy alloy prepared by laser ignited self-propagating sintering [J]. *Nonferrous Metals Engineering*, 2019, 9(4): 28-33.
- [3] 王金, 郝刚领, 李育川, 等. Cu-Al-Mn 形状记忆合金低频内耗研究[J]. *有色金属工程*, 2021, 11(10): 26-32.  
WANG Jin, HAO Gangling, LI Yuchuan, et al. Low-frequency internal friction properties of Cu-Al-Mn shape memory alloy [J]. *Nonferrous Metals Engineering*, 2021, 11(10): 26-32.
- [4] 李先雨, 郝刚领, 王伟国. Ti/Al 复合粉末压坯低温烧结过程的内耗特征[J]. *有色金属工程*, 2019, 9(9): 51-55.  
LI Xianyu, HAO Gangling, WANG Weiguo. Internal friction characteristics of Ti/Al composite powder compact during low-temperature sintering process [J]. *Nonferrous Metals Engineering*, 2019, 9(9): 51-55.
- [5] 吴子青, 杨旭东, 张震, 等. 2024 泡沫铝合金的制备方法与吸能性能[J]. *有色金属工程*, 2018, 8(2): 16-21.  
WU Ziqing, YANG Xudong, ZHANG Zhen, et al. Preparation methods and energy absorption properties of 2024 foamed aluminum alloy [J]. *Nonferrous Metals Engineering*, 2018, 8(2): 16-21.
- [6] 陈刚, 罗涛, 唐啸天, 等. 基于铝热反应多主元合金的成分调控[J]. *有色金属工程*, 2021, 11(9): 1-10.  
CHEN Gang, LUO Tao, TANG Xiaotian, et al. Composition control of multi-principal component alloys based on thermite reaction [J]. *Nonferrous Metals Engineering*, 2021, 11(9): 1-10.
- [7] MENG J S, SHI X P, ZHANG S J, et al. Friction and wear properties of TiN-TiB<sub>2</sub>-Ni based composite coatings by argon arc cladding technology [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2019, 374: 437-447.
- [8] AGRAWAL S, GHOSE A K, CHAKRABARTY I. Effect of rotary electromagnetic stirring during solidification of insitu Al-TiB<sub>2</sub> composites [J]. *Materials & Design*, 2017, 113: 195-206.
- [9] MOHSEN H Z, MIRZAEI O, SAIDI P. Structural and mechanical characterization of Al-based composite reinforced with heat treated Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particles [J]. *Materials and Design*, 2014, 54: 245-250.
- [10] 郝彦君, 刘金旭, 李建崇, 等. Al 含量微调对 TiAl 合金组织及压缩力学性能的影响[J]. *稀有金属材料与工程*, 2017, 46(3): 754-759.  
HAO Yanjun, LIU Jinxu, LI Jianchong, et al. Effects of aluminum content on microstructure and compressive properties of TiAl alloy [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2017, 46(3): 754-759.
- [11] MOHSEN H Z, MIRZAEI O, SAIDI P. Structural and mechanical characterization of Al-based composite reinforced with heat treated Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particles [J]. *Materials and Design*, 2014, 54: 245-250.
- [12] SINGH S, PAL K. Influence of surface morphology and UFG on damping and mechanical properties of composite reinforced with spinel MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>-TiB<sub>2</sub> core-shell microcomposites [J]. *Materials Characterization*, 2017, 123: 244-255.
- [13] 吴海华, 李亚峰, 贺俊超, 等. 选择性激光烧结成型技术制备低导热高强度石墨陶瓷复合型[J]. *材料热处理学报*, 2021, 42(2): 11-19.  
WU Haihua, LI Yafeng, HE Junchao, et al. Low thermal conductivity and high strength graphite ceramic composite mold prepared by selective laser sintering technology [J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2021, 42(2): 11-19.
- [14] 安荣, 田艳红, 孔令超, 等. 自支撑 Ti/Al 纳米多层膜激光诱发自蔓延行为 [J]. *金属学报*, 2014, 50(8): 937-943.  
AN Rong, TIAN Yanhong, KONG Lingchao, et al. Laser-ignited self-propagating behavior of self-

- supporting nano-scaled Ti/Al multilayer films[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2014, 50(8): 937-943.
- [15] 郭涛, 郭世柏, 胡涛, 等. (W, Mo)C-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 复合材料室温往复滑动摩擦磨损性能[J]. *金属热处理*, 2019, 44(4): 22-26.
- GUO Tao, GUO Shibai, HU Tao, et al. Ambient temperature reciprocated sliding wear behavior of (W, Mo)C-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite material[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2019, 44(4): 22-26.
- [16] FOX R T, NILSSON R. Binderless tungsten carbide carbon control with pressureless sintering[J]. *Refractory Metals and Hard Materials*, 2018, 76: 82-89.
- [17] KRESSE T, MEINHAED D, BERNTHALER T, et al. Hardness of WC-Co hard metals: Preparation, quantitative microstructure analysis, structure-property relationship and modelling[J]. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2018, 75: 287-293.
- [18] 陈永君. 激光引燃掺杂钨精矿粉原位合成铁铝基复合材料特性研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2011.
- CHEN Yongjun. Study on characteristics of in-situ synthesis of tungsten concentrates doped Fe-Al based composites by laser-induced self-propagating reaction[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2011.
- [19] 山泉, 张亚峰, 张哲轩, 等. 钨含量对 WCP/钢基表层复合材料压缩性能及热疲劳行为的影响[J]. *材料工程*, 2019, 47(2): 115-121.
- SHAN Quan, ZHANG Yafeng, ZHANG Zhexuan, et al. Hole diameter of honeycomb preform governing W diffusion uniformity in WC/Fe composites [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2020, 37(10): 2518-2525.

(编辑 崔 颖)